

絮凝剂和溶菌酶联用促进污泥脱水性能

罗璐^{1,2}, 施周^{1,2,†}, 周先敏^{1,2}, 李广超^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要:通过小试试验考察了絮凝剂(聚丙烯酰胺)和溶菌酶联合使用对污水厂二沉池回流污泥的脱水性能、沉降性能及絮体特性的影响,并与2种药剂单独作用时进行了对比研究.结果表明,絮凝剂和溶菌酶分别单独作用于污泥脱水时,均可改善污泥的脱水性能;但2种药剂共同作用时,能同时提高污泥沉降性能和脱水速度,且脱水程度较2种药剂单独处理时进一步提升.2种药剂联用时的最佳投加量为20 mL/L 絮凝剂+0.05 g/g 溶菌酶,且最优添加顺序为先絮凝剂再溶菌酶.此时污泥抽滤泥饼含水率和比阻分别为65.7%和 0.8×10^{12} m/kg,与原泥相比下降25.3%和75.8%.通过污泥胞外聚合物(EPS)含量与污泥絮体形态分析可知,溶菌酶可以有效破坏污泥絮体结构,改变污泥EPS的分布;高分子絮凝剂的吸附架桥作用则加快了污泥过滤脱水速度.而两者联合使用增大了污泥絮体二维分形维数,可使污泥絮体结构更加细密紧实,并提高污泥可脱除水分的比例,从而提高了污泥脱水性能.研究表明,絮凝剂和溶菌酶联用调理污泥脱水具有较好的应用前景.

关键词:絮凝剂;溶菌酶;污泥;脱水性能;分形维数

中图分类号:X522

文献标志码:A

Effect of Flocculant and Lysozyme Treatment on Sludge Dewaterability

LUO Lu^{1,2}, SHI Zhou^{1,2,†}, ZHOU Xianmin^{1,2}, LI Guangchao^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Batch experiments were employed to investigate the effect of flocculant and lysozyme treatment on the sludge dewaterability, settling performance and floc characteristics. The results showed that the sludge settling performance was improved in the presence of flocculant and lysozyme alone. When the flocculant and lysozyme worked together, both the sludge settling performance and dewatered speed were further enhanced. The optimum flocculant and lysozyme dosage in the combined system was 2 mL and 0.15 g/g, respectively. And the moisture content of the sludge cake and specific resistance were determined to be 65.7% and 0.08×10^{12} m, respectively, which were decreased by 25.3% and 75.8% compared with the original mud. The results of extracellular polymeric substance (EPS) and floc shape suggested that lysozyme could change the EPS distribution and crack the floc structure. The adsorption and bridge effect of the flocculant improved the sludge dewatering speed. The combination of flocculants and lysozyme increased the number of the two-dimensional fractal dimension of floc, made the floc structure closer and

* 收稿日期:2018-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078130), National Natural Science Foundation of China(51078130)

作者简介:罗璐(1984—),女,湖南长沙人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: zhous61@163.com

tighter, and improved the moisture ratio that could be dewatered in the sludge. This resulted in the enhanced sludge dewatering performance. This study demonstrated that the combination of flocculant and lysozyme on sludge dewaterability treatment has a promising application potential.

Key words: flocculant; lysozyme; sludge; dewaterability; fractal dimension

近年来,随着全国范围内环境保护意识的加强,城市生活污水处理产业发展迅速.与此同时,污水处理的副产物污泥产量也逐年显著提高.据统计,每年各大城市因污水处理所产生的干污泥约 $30 \times 10^4 \text{ t}^{[1]}$,仅有 20%得到了妥善处理,剩余未处理的污泥中,含有大量的有毒有害物质(例如病原微生物、重金属离子等),并对环境造成了严重污染.目前,污泥脱水减量处理及后续处置成为了亟待解决的环境热点问题^[2].

通常来说,主要通过向污泥投放化学药剂来进行脱水减量处置,常用的絮凝剂有聚丙烯酰胺(PAM)、聚合氯化铝(PAC)等.絮凝剂的投加,使污泥颗粒间结构增强,便于进行机械脱水操作^[3-5].但这些絮凝剂对污泥脱水的改善作用有限,需要对絮凝剂调理污泥的方法进行改进^[6-7].

有学者指出,生物酶无毒、无害、无二次污染,有望成为新兴的调理药剂^[8-9],而溶菌酶拥有能水解微生物细胞壁的特性^[10],具有通过溶解污泥细胞壁而促进污泥溶胞脱水的潜力.本文将溶菌酶应用到污泥脱水过程中,研究了将溶菌酶与传统脱水药絮凝剂联合使用对污泥脱水性能的影响,并与 2 种药剂单独作用时对比,探索污泥深度脱水新方法.

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验所用污泥取自某城市污水处理系统二沉池回流污泥,污泥质量浓度为 $25\ 000 \sim 28\ 000 \text{ mg/L}$,含水率 96%~98%.试验用污泥取回后静置沉降 4~6 h,再用 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 筛网进行过滤,然后放在冷藏柜中 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用.

试验所用溶菌酶 L7876 (活度: $20\ 000 \text{ U/mg}$) 购自美国 Sigma 公司;絮凝剂(聚丙烯酰胺(PAM))为巴斯夫 Zetage7650(质量分数为 3%).

试验所用主要仪器有:程控混凝试验搅拌机(TA6-2)、循环式多用真空泵(SHB-ⅢA)、倒置生物显微镜(XDS-1B)、电热鼓风干燥箱(101A-3B)、双

量程分析天平(AE240)、污泥比阻系统(自制).

1.2 试验方法

1.2.1 污泥调理

取 100 mL 恢复至室温后的污泥样品置于 250 mL 烧杯内,分别以溶菌酶投加量 0 g/g 、 0.05 g/g 、 0.1 g/g 、 0.15 g/g 、 0.2 g/g (酶与干污泥质量比)和絮凝剂投加量为 0 mL/L 、 1 mL/L 、 2 mL/L 、 3 mL/L 、 4 mL/L (絮凝剂投加量与污泥质量浓度比)来考察不同浓度加药量对污泥脱水作用及沉降性能的影响.

加入絮凝剂后以搅拌速度为 150 r/min 、搅拌时间 30 s 作为絮凝搅拌方式;加入溶菌酶时以搅拌速度 50 r/min 、搅拌时间 2 min 进行酶泥混合.

再通过正交试验确定絮凝剂和溶菌酶联用的最佳投加量,并改变投加的先后顺序考察溶菌酶与絮凝剂联用对污泥脱水、沉降性能及絮体特征的影响.

1.2.2 污泥沉降性能测定

取 100 mL 经不同药剂处理后的污泥倒入 100 mL 的量筒中,静置沉淀 30 min ,并记录不同时间刻度污泥的沉降体积随时间的变化.相同时间内,沉降污泥体积越小,沉降速度越快,沉降性能越好.

1.2.3 真空抽滤含水率的测定

以真空抽滤泥饼含水率来反映污泥的脱水程度,污泥泥饼含水率越低,则污泥可脱水的程度越高.使用重量法测量:取 100 mL 经絮凝剂和溶菌酶处理后的污泥倒入真空抽滤装置,控制真空度为 0.05 MPa ,抽滤 25 min 后,取出泥饼并称量湿污泥质量记为 (ω_1) ,然后再于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重,冷却后称量干污泥质量记为 (ω_2) ,泥饼含水率按式(1)计算.

$$\eta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.4 污泥比阻的测定

测量污泥比阻时,取 100 mL 经药剂处理后的污泥倒入布氏漏斗(过滤面积为 A ,单位: m^2),在抽滤压力 p 为 $5\ 000 \text{ kg/m}^2$ 真空度下过滤,记录不同时间 t_i (单位: s)抽滤液的体积 V_i (单位: m^3),并计算得到 V_i 与 t_i/V_i 的斜率 b (单位: s/m^3),待滤纸上泥饼出现龟裂

(同时真空度破坏)记录最终抽滤液体积 V (单位: m^3),用黏度仪记录抽滤液黏度 μ (单位: $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)及抽滤后泥饼干污泥质量,并计算得到单位抽滤液干污泥质量 ω (单位: kg/m^3),污泥比阻按式(2)计算^[1].

$$\text{SRF} = \frac{2\rho A^2}{\mu\omega} b \quad (2)$$

1.2.5 污泥絮体形态

试验用二维分形维数(D_2)表征污泥絮体的密实程度.先取少量的经药剂处理后的污泥混合液置于装有双蒸水的培养皿内,使其充分分散,然后用倒置生物显微镜对污泥絮体进行观察和拍照.采用图形处理软件(Image-pro plus 6.0)获取絮体颗粒投影面积 A 和特征周长 P ,根据 $A \propto P^{D_2}$ 计算污泥絮体二维分形维数 D_2 ^[12].

1.2.6 胞外聚合物的提取及测定

污泥胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substance, EPS)可分为松散层 EPS(Loosly Bound EPS, LB-EPS)和紧密层 EPS(Tightly Bound EPS, TB-EPS).EPS的分层提取采用离心和热提取法^[13],具体方法为:

1)取 25 mL 待测污泥放入 30 mL 离心管中,以 3 000 r/min 离心 10 min;将离心管倒置去除水分,留污泥待用.

2)浓缩后污泥重新加入 25 mL、质量分数为 0.85% 的 NaCl 溶液,20 kHz 超声处理 2 min,并以水浴振荡器 150 r/min 振荡 10 min;取离心管中上清液经 0.45 μm 滤膜过滤得到 LB-EPS;离心管中剩余污泥控干水份待用.

3)剩余污泥重新悬浮于质量分数为 0.85% 的 NaCl 溶液中;20 kHz 超声处理 3 min 后,再于 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 30 min;然后放入离心机,以 12 000 r/min 转速离心 20 min,最后取离心管中上清液经 0.45 μm 滤膜过滤得到 TB-EPS.

EPS 各组分的测定:蛋白质的测定采用考马斯亮蓝显色法,多糖的测定采用苯酚硫酸法^[14].EPS 总量为 LB-EPS 和 TB-EPS 之和,用总有机碳(TOC)表征其含量.

2 结果与讨论

2.1 单一药剂预处理后对污泥脱水的影响

2.1.1 单独溶菌酶调理对污泥脱水的影响

剩余污泥中加入溶菌酶调理后,进行真空过滤

脱水试验,其影响如图 1 所示.由图 1 可看出,溶菌酶预处理对污泥含水率和比阻的影响都较大.当溶菌酶投加量小于 0.15 g/g(酶与干污泥质量比)时,随着酶投加量的增加,真空抽滤泥饼含水率和污泥比阻逐渐降低.当投加量为 0.15 g/g,滤饼含水率由原泥泥饼含水率的 81.4% 下降到最低为 65.5%,溶菌酶能够明显增大污泥真空抽滤脱水程度.此时污泥比阻也从未处理的 3.3×10^{12} m/kg 降低到 1.0×10^{12} m/kg,下降了 69.7%,污泥过滤脱水速度也大幅增加.当溶菌酶的投加量大于 0.15 g/g 后,真空抽滤泥饼含水率和污泥比阻没有进一步降低,污泥脱水性能趋于稳定,溶菌酶的作用趋于饱和.试验结果表明,水解溶菌酶发挥了对细胞的破壁作用,并促使污泥絮体结构发生了解聚作用,使得污泥中易被脱除的水比例增加,对剩余污泥脱水有明显的促进作用.剩余污泥比阻数值的变化与抽滤泥饼含水率变化趋势有较好的一致性,这说明污泥经溶菌酶进行调质后,显著地提高了污泥的过滤性能,不仅增大了污泥的脱水程度,也降低了污泥脱水的难度.

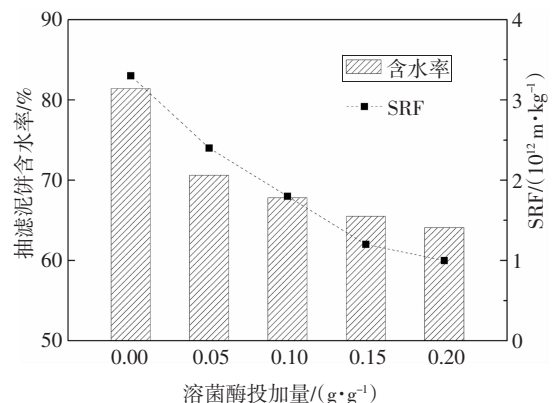


图 1 溶菌酶投加量对污泥脱水性能的影响

Fig.1 Effect of lysozyme dosages on the sludge dewaterability

2.1.2 单独絮凝剂调理对污泥脱水的影响

单独投加絮凝剂进行污泥脱水试验时,絮凝剂投加量大小对污泥脱水性能的影响如图 2 所示.当投加量为 10 mL/L 时,污泥含水率下降到 74.4%,污泥比阻从原泥的 3.3×10^{12} m/kg 下降至 2.2×10^{12} m/kg,絮凝剂的吸附架桥作用有利于污泥沉降和过滤脱水.但进一步加大投加量并不能更大程度地降低污泥含水率.当絮凝剂投加量增加到 30 mL/L 时,抽滤泥饼含水率反而增大到 90.6%,而比阻进一步降低到 0.5×10^{12} m/kg,较原泥下降了 80%.

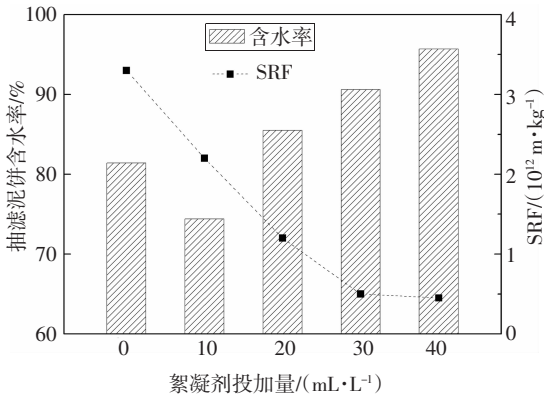


图2 絮凝剂投加量对污泥脱水性能的影响

Fig.2 Effect of flocculant dosages on the sludge dewaterability

加入过多絮凝剂时,污泥絮体尺寸过大,且胶粒间因压缩变形产生反弹力,在真空过滤脱水的过程中,污泥絮体难以进一步压缩.另一方面,过量絮凝剂也使胶体的颗粒电性产生正负电性转换的变化,导致胶体颗粒产生静电排斥效应,排布会变得更加分散,从而减弱污泥脱水能力^[5].试验有机高分子絮凝剂能够增进污泥的过滤脱水速度,但难以进一步降低污泥含水率以增加其脱水程度,这与柳海波等的研究结果类似^[6].

2.2 絮凝剂和溶菌酶联用调理对污泥脱水的影响

进一步考察絮凝剂和溶菌酶2种药剂共同使用对污泥脱水的影响,通过L16(4⁴×2³)混合水平正交试验,考察了100 mL污泥样中,絮凝剂投加量为0 mL/L、10 mL/L、20 mL/L、30 mL/L,溶菌酶投加量为0 g/g、0.05 g/g、0.10 g/g、0.15 g/g,及不同投加顺序对污泥脱水后泥饼含水率和比阻的影响.从试验结果综合考虑,溶菌酶投加量为0.05 g/g、絮凝剂投加量为20 mL/L时为联用最佳投加量.

在絮凝剂和溶菌酶联用最佳投加量下,2种药剂共同作用及改变投加方式对污泥脱水性能的影响如图3和图4所示.

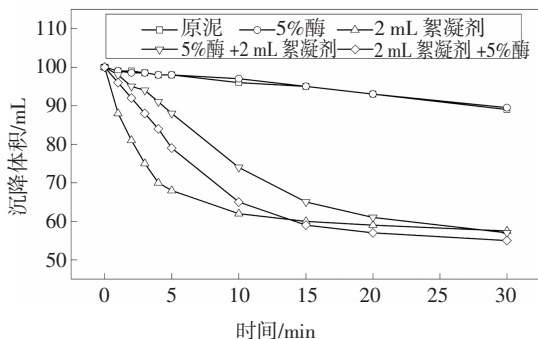


图3 絮凝剂和溶菌酶联用对污泥沉降性能的影响

Fig.3 Effects of sludge settleability at various dosing way

图3考察了絮凝剂和溶菌酶联用对污泥沉降性能的影响.由图3可知,单独使用溶菌酶对污泥的沉降性能影响较小,而絮凝剂的长链分子能够促进污泥絮体间良好的吸附架桥作用,污泥的沉降性能得到有效提升,溶菌酶和絮凝剂联用则能较大幅度地增强污泥的沉降效果.相同的絮凝剂及溶菌酶投加量下,投加顺序的不同对污泥的沉降性能的改善程度不同,先投加絮凝剂效果优于先投加溶菌酶.经过2种药剂联用调理后的污泥体积比原体积减小了近50%,减容效果明显,有利于污泥的后续处置.

絮体粒径和胞外聚合物EPS能有效影响污泥的沉降性能,在沉降初始阶段,污泥的粒径越大越有利于改善污泥沉降效果,而游离结合态EPS的含量过多则会阻碍污泥沉降性能的提高^[7].溶菌酶通过水解微生物细胞壁上的肽聚糖而破坏污泥絮体结构,从而使污泥EPS含量分布发生变化甚至溶解脱落;絮凝剂PAM为高分子有机絮凝剂,其主要机理是吸附架桥作用.先投加溶菌酶时,污泥颗粒变得非常细小,再加入絮凝剂后絮凝效果没有显著改善;而通过絮凝剂预处理后,污泥已经形成较大的絮体颗粒,再经溶菌酶处理时,在不破坏絮凝剂形成的吸附架桥结构的同时,能充分释放污泥细胞内水分,得到更利于沉降脱水的污泥絮体.

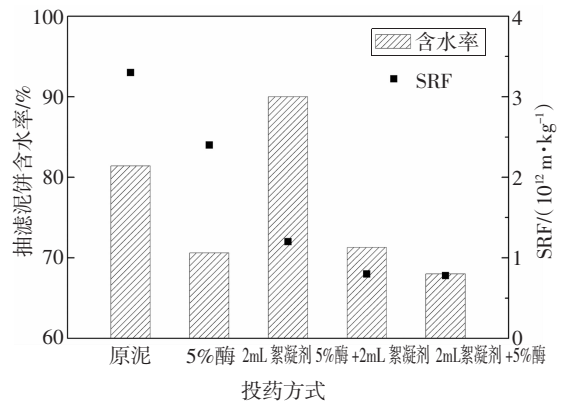


图4 絮凝剂和溶菌酶联用对污泥泥饼含水率及比阻的影响

Fig.4 Effects of water content after filtration and SRF of sludge at various dosing way

图4所示为絮凝剂和溶菌酶联用对污泥抽滤泥饼含水率及污泥比阻的影响.由图4可知,原泥的抽滤泥饼含水率和比阻分别为81.4%和3.3×10¹² m/kg,加入0.05 g/g溶菌酶调理后含水率和比阻降为70.6%和2.4×10¹² m/kg,部分改善了污泥的脱水程度及速度;加入2 mL絮凝剂后,污泥比阻值为1.2×10¹² m/kg,降低了64%,絮凝剂的调理对污泥比阻的影响大于真空抽滤泥饼含水率.絮凝剂和溶菌酶联

用后,调理方式为先加溶菌酶再加絮凝剂时,泥饼含水率为 71.3%,污泥比阻达到 0.8×10^{12} m/kg,污泥脱水速度与加絮凝剂相比变化不大,脱水程度也近于 0.05 g/g 溶菌酶的调理效果。而调理方式改为先投加絮凝剂再投加溶菌酶时,泥饼含水率和比阻分别下降至 65.7% 和 0.8×10^{12} m/kg,较原泥下降了 25.3% 和 75.8%,污泥的脱水性能较 2 种药剂单独作用时得到进一步改善。

由试验结果可看出,经溶菌酶和絮凝剂联用处理后污泥脱水速度和脱水程度均有较大程度的提高,但先加入絮凝剂的效果比先加入酶的好。分析认为溶菌酶可高效促进污泥细胞破壁以改变其絮体结构,同时附着在胞外聚合物 EPS 的分布和含量也随之发生变化,并使污泥中水分进一步转变为自由水,最后使污泥的脱水速度和脱水程度都能有效提高^[18]。污泥先通过溶菌酶处理后,脱水性能已得到较大程度的提高,再用絮凝剂处理时,对污泥含水率的进一步改善不明显,并且过于细密的污泥颗粒表面会吸附一部分多余水分,不利于絮凝,影响其过滤脱水的速度。而先加入絮凝剂,能先发挥其吸附架桥作用,有助于形成较大污泥絮体结构,除了能降低表面吸附的结合水外,也能为后续的酶促反应提供较好的空间环境,能释放出更多的自由水,进一步增加了其脱水程度。

综上所述,絮凝剂可明显改善污泥沉降性能,并能较好地提升其脱水程度和速度,但污泥絮体内部仍存在部分结合水,还有进一步降低泥饼含水率的空间;经溶菌酶后续调理后,污泥的脱水程度和速度还可以提高。两者的投加顺序不同对试验结果产生不同影响,因此在 2 种药剂联用处理剩余污泥时宜选择先加絮凝剂后加溶菌酶作为加药方式。

2.3 污泥 EPS 含量及分布分析

胞外聚合物 EPS 被认为是具有流变性的双层结构,其总量和主要物质在各个分布层内含量变化对污泥脱水性能有着不同的影响^[19-20]。絮凝剂和溶菌酶对污泥进行调理后,考察了污泥 EPS 各个分布层中总量(TOC)、蛋白质(PN)、多糖(PS)的含量和变化,及对污泥脱水作用的影响。试验结果见图 5。

原泥中 EPS 总含量约为 22.16 mg/g,松散层(LB)EPS 含量(TOCLB)为 4 mg/g,紧密层(TB)EPS 含量(TOCTB)为 18.16 mg/g。LB 层中蛋白质含量(PNLB)为 0.32 mg/g,多糖含量(PSLB)为 0.78 mg/g;TB 层中蛋白质含量(PNTB)为 0.48 mg/g、多糖含量

(PSTB)为 15.39 mg/g。蛋白质和多糖总量约为 16.97 mg/g,约占 EPS 总量的 76.6%。

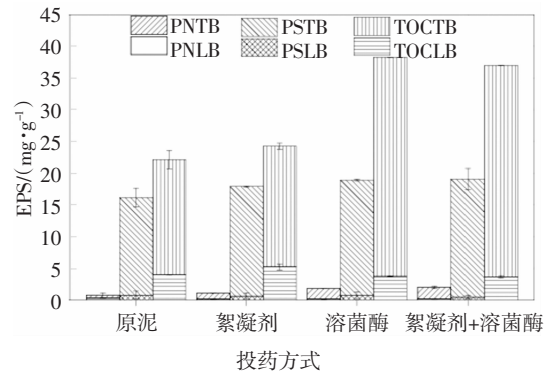


图 5 污泥 EPS 总量/主要成分含量和分布图

Fig.5 Protein and polysaccharide mass concentrations in different portions of EPS

研究发现,污泥经过不同药剂调理后,EPS 的含量和分布都产生了变化。当加入絮凝剂时,EPS 总量增大,达到 24.27 mg/g, LB 层 EPS 含量增大,TOCLB 为 5.23 mg/g,PN 和 PS 含量减少,PNLB 为 0.15 mg/g,PSLB 为 0.65 mg/g;TB 层 EPS、PN 和 PS 含量均有增大,TOCTB 为 19.04 mg/g,PNTB 为 0.92 mg/g、PSTB 为 17.26 mg/g。当仅加入溶菌酶时,EPS 含量也有增大,达到 38.28 mg/g,其中 LB 层 TOCLB 为 3.74 mg/g、PNLB 为 0.16 mg/g、PSLB 为 0.70 mg/g,TB 层 TOCTB 为 34.54 mg/g、PNTB 为 1.66 mg/g、PSTB 为 18.23 mg/g。当溶菌酶和絮凝剂 2 种药剂联用时,EPS 含量增大到 36.99 mg/g,其中 LB 层 TOCLB 为 3.68 mg/g、PNLB 为 0.20 mg/g、PSLB 为 0.47 mg/g,TB 层 TOCTB 为 33.31 mg/g、PNTB 为 1.78 mg/g、PSTB 为 18.60 mg/g。从数据可看出,在加入溶菌酶和溶菌酶与絮凝剂联合调理的情况下,都会使污泥 LB 层 EPS 总量、PN 和 PS 含量下降,但污泥 TB 层 EPS 总量、PN 和 PS 含量都有明显提高。

EPS 中 LB 层 PN、PS 含量并不会对污泥的脱水程度造成影响,TB 层中 PN、PS 含量的增加能轻微促进污泥的脱水程度;而双层结构中 EPS 分布和 TOCLB/TOCTB 含量则能显著影响污泥脱水程度,该比值越低则污泥的脱水程度越好^[21]。空白样 TOCLB/TOCTB 为 0.22,絮凝剂单独调理后 TOCLB/TOCTB 升高到 0.27,因而污泥脱水程度没有得到有效提升,溶菌酶单独或和絮凝剂联合调理后 TOCLB/TOCTB 降低到 0.11,因此能大为增进污泥脱水程度。

2.4 污泥絮体形态的变化

污泥絮体结构会对污泥的脱水性能有显著影响,用“分形”来描述污泥絮体结构,因此分形在污泥研究领域也受到广泛关注^[22-23].二维分形维数(D_2)用来表征污泥絮体颗粒的密实程度,分形维数越小,表明絮体颗粒越疏松,反之分形维数越接近2,絮体颗粒越密实^[24].

由图6和图7可知,原泥的 D_2 值最小,仅为1.33,絮体结构最疏松,脱水性能最差;溶菌酶处理后污泥 D_2 值增加到1.43,证明溶菌酶通过溶解细菌的细胞壁,有效地破坏了污泥的絮体结构,使污泥颗粒变得细密而紧实;污泥经絮凝剂处理后,絮体颗粒通过吸附架桥作用变大而相对较密实, D_2 值增加到1.61,污泥絮体结构的增大有助于提高过滤脱水速度.但观察图6(c)后可发现污泥絮体仍有孔隙存在,这些孔隙仍会吸附大量水分,阻碍污泥脱水程度的提高;污泥经絮凝剂预处理后再投加溶菌酶可进一步压缩污泥絮体结构,改变污泥中EPS分布,使易脱除掉的水分比例增加, D_2 值增加到最高值1.69,污泥的沉降速度、脱水速度和程度都得到显著改善.反之,若先投加溶菌酶再经絮凝剂调理, D_2 值仅为1.55.试验结果进一步证明,先投加絮凝剂后投加溶菌酶的加药方式能显著改善污泥脱水性能,提高污泥脱水能力.

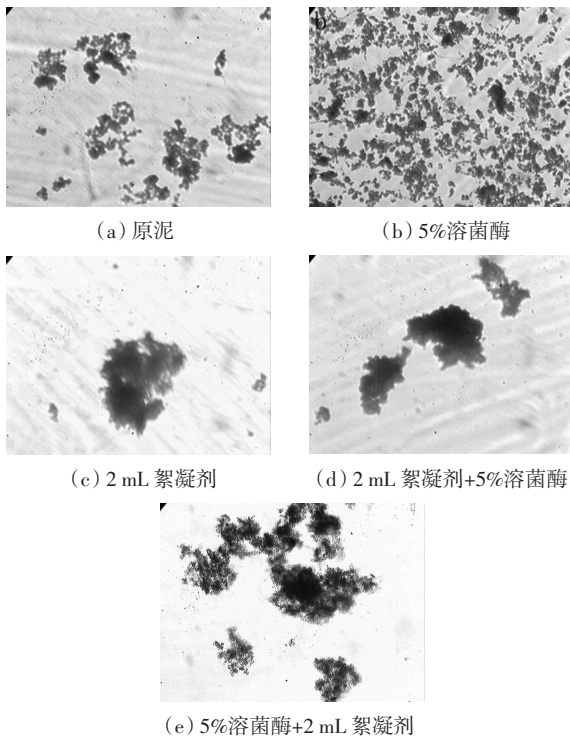


图6 污泥显微照片($\times 150$)

Fig.6 Micrograph of sludge floc($\times 150$)

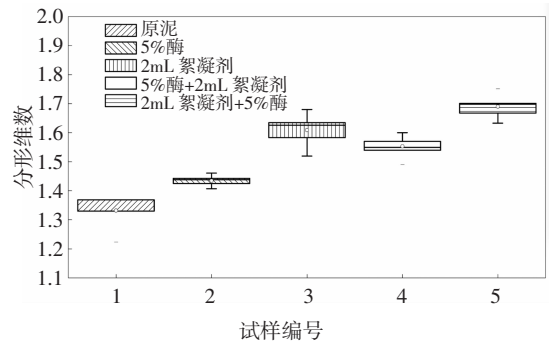


图7 污泥分形维数

Fig.7 Fractal dimension of sludge floc

3 结论

1)溶菌酶和絮凝剂单独对污泥进行调理,对污泥的脱水性能均有影响.溶菌酶预处理可显著降低污泥真空抽滤泥饼含水率和污泥比阻值,有利于污泥脱水;絮凝剂的作用可加快污泥的脱水速度.

2)溶菌酶和絮凝剂联合使用对污泥进行脱水预处理时,可显著改善污泥的脱水能力,增强污泥的沉降性能,减容效果良好.联用的最佳投加量为20 ml/L 絮凝剂+0.15 g/g 溶菌酶,此时,污泥抽滤泥饼含水率、比阻分别65.7%和 0.08×10^{12} m/kg,与原泥相比分别下降25.3%和75.8%.联用时先投加絮凝剂比先投加溶菌酶脱水效果好.

3)溶菌酶通过对污泥细胞的融胞作用,破坏了污泥絮体结构,改变了污泥中EPS分布,促使污泥中易于脱除的水分比例增加;絮凝剂促进污泥絮体间形成良好的吸附架桥作用,有利于污泥的沉降及增进了过滤效果;两者联合使用使污泥絮体二维分形维数增大,形成含水率低及脱水性能更好的絮体结构.

参考文献

- [1] 曹秀芹,杜海近.污泥处理处置技术发展现状及分析[J].环境工程,2013,31(S1):561—564.
CAO X Q, DU H J. Analysis of the technology development of sludge treatment and disposal [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 561—564. (In Chinese)
- [2] E20 研究院.中国污泥处理处置市场分析报告[R].北京:北京易二零环境股份有限公司,2017:20—30.
E20 Research Institute. Market analysis report on sludge disposal in China [R]. Beijing: E20 Environment Platform, 2017: 20—30. (In Chinese)
- [3] 刘秉涛,姜渊知,徐菲.聚合氯化铝/壳聚糖复合絮凝剂在活性

- 污泥中的调理作用[J]. 环境化学, 2007, 26(1):42—45.
- LIU B T, LOU Y Z, XU F. Effect of polymeric aluminum chloride/chitosan composite flocculant on activated sludge [J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(1):42—45. (In Chinese)
- [4] 刘千钧, 詹怀宇, 刘明华, 等. 两性木素絮凝剂对生物活性污泥的絮凝脱水性能[J]. 造纸科学与技术, 2004, 23(3):27—29.
- LIU Q J, ZHAN H Y, LIU M H, *et al.* The performance of an amphoteric lignin flocculant on microbial sludge dewatering [J]. Paper Science & Technology, 2004, 23(3):27—29. (In Chinese)
- [5] 杨阿明, 张志强, 王学江, 等. 高效微生物絮凝剂用于污泥脱水及其动力学研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(9):24—27.
- YANG A M, ZHANG Z Q, WANG X J, *et al.* Study on high-efficiency microbial flocculant for sludge dewatering and its dynamics [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(9):24—27. (In Chinese)
- [6] 王硕, 陈晓光, 陈宇, 等. 城市污水处理厂污泥深度脱水技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12Q):186—190.
- WANG S, CHEN X G, CHEN Y, *et al.* Recent advances on deep dewatering of sludge in wastewater treatment plant [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(12Q):186—190. (In Chinese)
- [7] 杨麒, 邓晓, 罗琨, 等. 生物表面活性剂对污泥脱水性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(7):64—69.
- YANG Q, DENG X, LUO K, *et al.* Effect of biosurfactant on sludge dewaterability [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(7):64—69. (In Chinese)
- [8] NOVAK J T, SADLER M E, MURTHY S N. Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids [J]. Water Research, 2003, 37(13):3136—3144.
- [9] BONILLA S, TRAN H, ALLEN D G. Enhancing pulp and paper mill biosludge dewaterability using enzymes [J]. Water Research, 2015, 68:692—700.
- [10] 陈伟, 贾原媛, 郑伟, 等. 胞外多聚物对酶催化污泥厌氧水解的影响研究[J]. 环境科学, 2011, 32(8):2334—2339.
- CHEN W, JIA Y Y, ZHENG W, *et al.* Influence of extracellular polymeric substance on enzyme hydrolysis of sludge under anaerobic condition [J]. Environmental Science, 2011, 32(8):2334—2339. (In Chinese)
- [11] LIU C G, ZHANG P Y, ZENG G M, *et al.* Sewage sludge conditioning by bioleaching—dual PAC and PAM addition [J]. Environmental Science, 2010, 31(9):2124—2128.
- [12] WANG Y L, DIEUDE-FAUVEL E, DENTEL S K. Physical characteristics of conditioned anaerobic digested sludge—a fractal, transient and dynamic rheological viewpoint [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(8):1266—1273.
- [13] CHEN Z, ZHANG W J, WANG D S. Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology [J]. Water Research, 2015, 83: 367—376.
- [14] FROLUND B, PALMGREN R, KEIDING K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. Water Research, 1996, 30(8):1749—1758.
- [15] LI H S, WEN Y, GAO A S, *et al.* The influence of multivalent cations on the flocculation of activated sludge with different sludge retention times [J]. Water Research, 2014, 55(2):225—232.
- [16] 柳海波, 张惠灵, 范凉娟, 等. 投加调理剂与表面活性剂对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(3):10—14.
- LIU H B, ZHANG H L, FAN L J, *et al.* Effect of joint action of inorganic conditioner and surfactant on dewaterability of sludge [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(3):10—14. (In Chinese)
- [17] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 活性污泥的表面特性与其沉降脱水性能的关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6):766—769.
- WANG H W, LI X Y, ZHAO Q X. Surface properties of activated sludge and their effects on settleability and dewaterability [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(6):766—769. (In Chinese)
- [18] SALTON M R. The properties of lysozyme and its action on microorganisms [J]. Bacteriological Reviews, 1957, 21(2):82—100.
- [19] POXON T L, DARBY J L. Extracellular polyanions in digested sludge: measurement and relationship to sludge dewaterability [J]. Water Research, 1997, 31(4):749—758.
- [20] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Stability of sludge flocs under shear conditions: roles of extracellular polymeric substances (EPS) [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, 93(6):1095—1102.
- [21] LI H S, WEN Y, GAO A S, *et al.* The influence of additives (Ca^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+}) on the interaction energy and loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge and their flocculation mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2012, 114(2):188—194.
- [22] 谢敏. 净水厂排泥水浓缩脱水特性及调质形态学研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007:73—76.
- XIE M. Study on concentration and dewatering characteristics and conditioning morphology of discharged water treatment plant sludge [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2007: 73—76. (In Chinese)
- [23] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 不同泥龄下活性污泥絮体性状的研究 [J]. 环境化学, 2009, 28(1):10—15.
- ZHU Z, LI T, WANG D S, *et al.* Effect of solids retention time on floc characteristics [J]. Environmental Chemistry, 2009, 28(1):10—15. (In Chinese)
- [24] 李婷, 王毅力, 冯晶, 等. 活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系[J]. 环境科学, 2012, 33(3):889—895.
- LI T, WANG Y L, FENG J, *et al.* Relation between physicochemical characteristics of activated sludge and polymer conditioning dosage [J]. Environmental Science, 2012, 33(3):889—895. (In Chinese)